

考虑馈源位置误差的面天线 机电耦合优化设计

李 鹏, 郑 飞, 段宝岩

(西安电子科技大学机电科技研究所, 陕西西安 710071)

摘 要: 针对面天线结构设计中存在的机电分离以及忽视馈源位置误差的问题,从机械电磁两场耦合的角度,将反射面天线主面误差和馈源位置误差统一到天线方向图的远场计算公式中,从而可以研究包含馈源支撑结构在内的天线结构参数对主要电性能(包括增益、副瓣、波瓣宽度、指向精度等)的影响.利用该公式建立了包含馈源支撑结构参数的天线整体机电耦合优化模型,通过某8m天线的仿真对比表明了该耦合优化模型的优点,最后将该优化模型应用于某40m大型反射面天线,取得了满意的效果.

关键词: 面天线; 机电耦合; 优化模型; 馈源位置误差

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 06-1377-06

Electromechanical Coupling Optimization Design of Reflector Antennas Including Feed Position Error

LI Peng, ZHENG Fei, DUAN Bao-yan

(Research Institute on Mechatronics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, Chian)

Abstract: For the problem of electromechanical separation and negligence of feed position error in reflector antenna design. From the angle of electromechanical coupling, the distortion of main reflector and position error of feed were introduced in the formula of antenna's far field pattern. So the effect of structure parameters including feed support structure on the main electrical parameter (such as gain, side lobe, beam width, pointing accuracy) could be researched. Due to the proposed formula, a new electromechanical coupling optimization model of whole antenna including feed support structure parameters was proposed. Simulation was done via an 8m reflector antenna. Result shows that the optimization model is more efficient than tradition ones. Finally the proposed optimization model is applied to a 40m reflector antenna with good results.

Key words: reflector antennas; electromechanical coupling; optimization model; feed position error

1 引言

大型面天线应用广泛,尤其在深空探测、载人航天等领域.而天线作为一种典型的机电一体化的设备,结构特性和电磁特性是相互影响、相互制约的.必须从机电耦合、学科交叉的角度研究,才能设计出高性能的天线.天线主反射面对电性能的影响关系一直是研究的重点.文[1,2]研究了反射面的随机误差和系统变形对天线电性能的影响.文[3,4]以面精度为目标进行了星载可展开面天线的结构优化设计.考虑多种工况和环境因素的面天线分析优化与设计也有研究^[5,6].文[7,8]从机电集成的角度进行了天线的优化设计.

天线馈源的位置误差同样会影响电性能.早期的文[9]开展了天线副面(馈源)支撑结构对电性能的影响及其优化研究.文[10]研究如何修正副面形状以补偿主面

变形造成的电性能损失.文[11]对天线副面和馈源位置误差对增益损失的影响做了分析.这些研究都是在机械或电磁各自领域独立开展的,个别文献虽然涉及到机电两个学科,也只是根据 Ruze 公式,通过结构精度简单估算天线的增益损失,即没有涉及馈源及其支撑的结构参数,也无法考虑副瓣、波瓣宽度、指向精度等其他电性能指标.而工程实践的经验表明,单一的结构精度指标是难以全面反映天线的电性能参数的^[7,8].

以上针对主面或者馈源的研究多是单独进行的,但是馈源和主面的影响是相互耦合、共同作用的,故两者应该作为一个天线整体进行研究.本文就是针对以上研究的不足,从机电耦合的角度,通过包含具体结构参数的电性能计算公式,针对大型桁架面天线整体,研究包含天线馈源结构参数在内的机电耦合优化设计方法.

2 包含主面和馈源误差的耦合计算公式

反射面天线在多种外部载荷(如振动冲击、重力、风荷、冰雪、太阳辐射等)的作用下,会导致主面的微小变形,以及馈源的位置和指向变化.主面的变形和馈源的位移会改变电磁波传播的路径进而影响口径面的相位分布^[1,2],馈源指向变化会影响口径面的幅度分布^[12],上述三种因素共同作用导致天线远场方向图改变,使得天线主要电性能变差,如增益下降、副瓣升高、指向精度变差等.同时考虑上述三种因素影响时的天线远场方向图可表示为:

$$E(\theta, \phi) = \iint_S \frac{f(\xi + \delta_\theta, \phi + \delta_\phi)}{r'} e^{jk r' \cdot d} e^{j\delta} e^{j\phi(\rho', \phi')} \rho' d\rho' d\phi' \quad (1)$$

其中 $f(\xi, \phi)$ 和 $\phi(\rho', \phi')$ 分别表示天线口径面的幅度和相位分布函数; $f(\xi + \delta_\theta, \phi + \delta_\phi)$ 体现了馈源指向变化对幅度分布的影响, δ_θ 和 δ_ϕ 分别表示馈源在两个方向上的指向变化角度; $e^{jk r' \cdot d}$ 表示馈源位置误差对相位的影响, d 是馈源偏移的距离矢量. $e^{j\delta}$ 表示主面变形对相位的影响, $\delta = 4\pi \Delta z(\rho', \phi') \cos^2(\xi/2)/\lambda$, $\Delta z(\rho', \phi')$ 是反射面表面的轴向位移; $k = 2\pi \cdot \text{freq}/3 \times 10^8$, freq 是天线频率. 相关变量如图 1 所示.

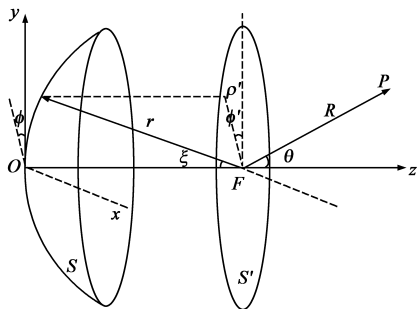


图1 反射面天线变量示意图

式(1)中,将结构位移场的参数(主面和馈源的结构位移、馈源指向变化角度),通过对天线电磁场幅度和相位的影响,引入到天线远场的计算公式中.而结构位移场的参数又是结构参数(包括背架、馈源支撑的形状尺寸、拓扑结构以及材料类型)的函数.该公式建立了众多结构参数与主要电性能参数之间的联系,使得天线结构设计人员可以直接在结构参数的层面分析天线的主要电性能,从而避免了单一结构精度难以准确反映天线主要电性能的不足.

对于式(1)的二重积分,通常将积分区域划分成 N 个网格,使用数值积分求解,如下式:

$$E(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^N \frac{f(\xi_i + \delta_{\xi_i}, \phi_i + \delta_{\phi_i})}{r'_i} e^{jk r'_i d} e^{j\phi(\rho'_i, \phi'_i)} e^{j\delta_i} \Delta \rho'_i \Delta \phi'_i \quad (2)$$

由于 Gauss 积分的精度远高于其它数值积分方法,本文使用 Gauss 积分求解^[13].

3 机电耦合优化模型

天线的用途和工作环境不同,结构设计时的优化模型也不同.对于地基的面天线,通常的优化模型是以面精度为目标,以背架的形状尺寸、拓扑结构以及材料类型为设计变量,约束条件为结构重量和背架材料、尺寸、类型以及应力的允许范围.星载的面天线,由于工作环境的特殊性,则通常以重量为优化设计目标,以面精度为约束.

上述的面精度是由电磁设计人员给出的,根据 RUZE 公式估算天线增益损失,目前常用其它一些改进的公式^[8],如:

$$\Delta G = 685.81 \left(\frac{2f}{R\sqrt{\ln(1 + \frac{1}{(2f/R)^2})}} \cdot \sigma / \lambda \right)^2 \quad (3)$$

式中, f , R , λ , σ 分别为天线焦距、半径、波长和表面均方根误差.

本文使用式(1)代替式(3),使得在优化设计中不仅可以考虑增益损失,也可以考虑副瓣、波瓣宽度、指向误差等主要电性能.同时在设计变量中包含馈源支撑的结构参数,实现面天线整体的机电耦合优化.具体优化模型如下:

$$\text{PI: Find } (\beta, \alpha) = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_R, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r) \quad (4)$$

$$\text{Min } W \text{ or } G \quad (5)$$

$$\text{S.T. } \Delta G(\beta, \alpha) \leq \Delta G_{\max} \text{ or } W(\beta, \alpha) \leq W_{\max} \quad (6)$$

$$\sigma_i(\beta) \leq \overline{\sigma_{\max}}, (i = 1, 2, \dots, M) \quad (7)$$

$$\sigma_j(\alpha) \leq \overline{\sigma_{\max}}, (j = 1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

$$\beta_{i\min} \leq \beta_i \leq \beta_{i\max}, (i = 1, 2, \dots, M) \quad (9)$$

$$\alpha_{j\min} \leq \alpha_j \leq \alpha_{j\max}, (j = 1, 2, \dots, N) \quad (10)$$

其中, β 为主面背架类结构设计变量, α 为馈源支撑类结构设计变量, W 为天线重量, $G, \Delta G$ 为电性能指标和指标变化量, σ_i 为第 i 个单元的实际应力值, M, N 分别为背架和支撑的单元总数, $\overline{\sigma_{\max}}$ 为许用应力值; $\beta_{i\min}$ 、 $\beta_{i\max}$ 和 $\alpha_{j\min}$ 、 $\alpha_{j\max}$ 分别为背架和馈源支撑结构的第 $i(j)$ 个设计变量的下、上限值.

对于该优化模型的求解,首先编写 ANSYS 软件的 APDL 命令流文件,实现天线结构的建模、加载与结构分析,并输出结点坐标和位移.其次根据式(2)编写程序计算天线的远场方向图,由方向图提取主要电性能参数,包括增益、第一副瓣、波瓣宽度等.最后使用 ISIGHT 优化软件按顺序调用 ANSYS 和电性能计算程序,实现优化迭代过程.优化算法选用 ISIGHT 软件集成的遗传算法.

4 典型 8m 天线的仿真算例

以常见的某 8m 反射面天线为例,天线焦距 $f=300\text{cm}$,工作频率 12.5GHz .图 2 为反射面天线四分之一背架结构的示意图,97 根杆件被划分为 12 类,具体划分见表 1.背架为钢结构,材料的弹性模量为 210MPa ,密度为 $7.85\times 10^3\text{kg/m}^3$.为了对比使用三种优化方法:传统结构优化方法、只考虑主面背架的耦合优化和包含馈源的整体耦合优化.

传统结构优化设计变量包括 12 类杆件的截面积和 4 个节点,即节点 5、6、7、8 的半径和 Z 向坐标(图 2),约束为天线表面均方根误差不超过 0.5mm ,目标为结构重量最轻.载荷为重力和同重力方向的力.此时天线增益损失使用式(3)估算为 0.2463dB .

为了方便对比,只考虑主面的耦合优化的设计变量、目标和载荷与传统结构优化相同,约束为天线增益

损失小于结构优化面精度为 0.5mm 时的 0.2463dB .计算天线增益时考虑馈源位置误差的影响,因而在图 3 结构上增加一根馈源支撑杆,连接结点 4 和天线焦点处的馈源,总共有 4 根.

同样,包含馈源的耦合优化的目标和载荷与传统结构优化相同,约束为天线增益损失小于 0.2463dB .设计变量中,背架类变量不变,加入馈源支撑结构的设计变量,即支撑杆的截面积 F_1 和杆与背架连接点的位置 F_2 . F_2 包括图 3 中的点 2、3、4,是离散变量.

表 1 某 8m 反射面天线背架单元分类

类别	面积	杆位置	类别	面积	杆位置	类别	面积	杆位置
1	30	(9)、(12)	5	20	(18)、(19)	9	15	(6)、(7)
2	20	(5)、(8)	6	15	(16)、(17)	10	15	(10)、(11)
3	15	(1)、(4)	7	10	(14)、(15)	11	30	(13)、(21)
4	30	(22)、(20)	8	10	(2)、(3)	12	10	(23)、(24) (25)、(26) (27)、(28)

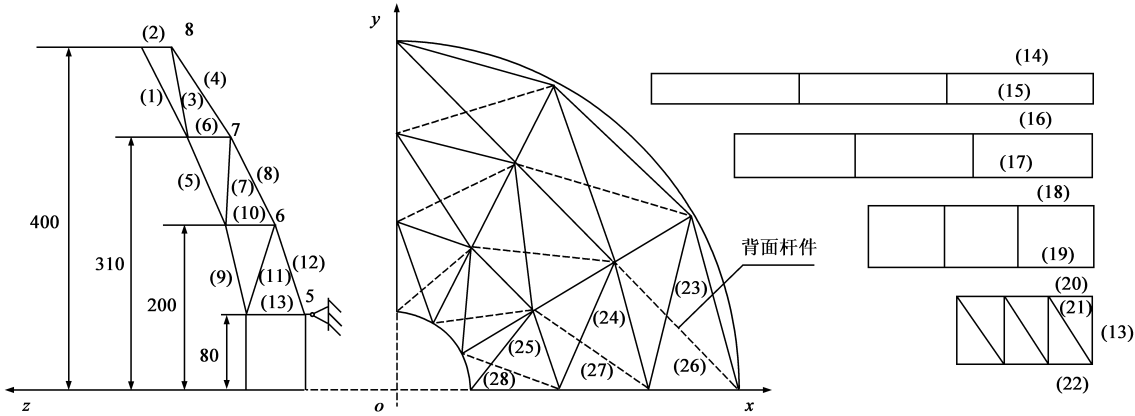


图2 某8m反射面天线背架结构示意图

表 2 耦合优化和传统优化结果对比(长度单位:cm)

优化变量	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}
传统优化	22.0	17.0	6.0	6.0	7.0	8.0	15.0	5.0	7.0	3.0	3.0	5.0
主面优化	30.0	21.0	8.0	11.0	5.0	15.0	14.0	6.0	8.0	2.0	2.0	3.0
整体优化	18.0	13.0	8.0	5.0	3.0	4.0	8.0	4.0	5.0	4.0	4.0	4.0
优化变量	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	R_1	R_2	R_3	R_4	F_1	F_2	约束	$W(\text{kg})$
传统优化	2.0	53.0	121.0	162.0	150.0	200.0	281.0	342.0	无	无	rms	741.50
主面优化	2.0	51.0	123.0	167.0	150.0	200.0	293.0	365.0	无	无	dG	844.78
整体优化	4.0	53.0	159.0	189.0	150.0	194.0	303.0	357.0	4.0	2	dG	573.58

表 2 是三种优化方法结果对比,传统结构优化以电性能要求的 0.5mm 面精度为约束,根据式(3)估算的主面损失增益为 0.2463dB ,得到结构重量是 741.5Kg ,主面精度是 0.499mm ,由于馈源还存在位置误差,计算得到天线的整体增益损失为 0.5790dB .如果结构设计合理,馈源的位置误差能够补偿主面变形,天线整体的增益损失会小于主面变形导致的增益损失,但是如果结构设计不合理,则正好相反.可见天线主面的面精度虽然满足要求,但电性能仍然不满足设计指标.这正是由

于机电分离的设计导致的.

只考虑主面背架结构变量的耦合优化,直接以 0.2463dB 的天线整体增益损失为约束,不考虑具体的面精度,优化的结构重量是 844.78kg ,高于传统结构优化.这是由于结构不但要保证主面变形也要保证馈源的变形不能过大,因而付出了更大的重量代价,但是增益损失满足要求.可见即使采用机电耦合优化,但是没有将天线主面和馈源支撑结构作为一个整体考虑,仍然难以得到较好的天线结构设计方案.

而将馈源和主面作为天线整体优化时,不但保证增益损失小于 0.2463dB 的约束,结构重量也降至 573.58kg,明显好于前两者优化的结果.此时的主面精度为 0.768mm,虽然较大,但是馈源的位移补偿了主面变形,因而电性能仍然满足要求.这也表明原来 0.5mm 的精度要求不够合理,单一的结构精度不能准确的反映天线电性能.此时馈源支撑杆与背架连接于结点 2,相对于结点 3 和结点 4,杆的长度缩短,也改善受力状况.

图 3 是包含馈源的耦合优化的单片纵向筋(辐射梁)优化前后结构对比,可见优化后纵向筋背架杆件的布局由初始的梯形变成锯齿形,与中心体连接的节点坐标向外向上移动,使中央圆环截面由矩形变为梯形,这将改善中心体的受力情况,边缘部分的节点向内向上移动,有利于减轻自重.此时馈源支撑杆与背架连接于结点 2,相对于结点 3 和结点 4,杆的长度缩短,也改善受力状况,这一结果是合理的.天线拓扑结构的优化结果与文献[14]的结果符合.

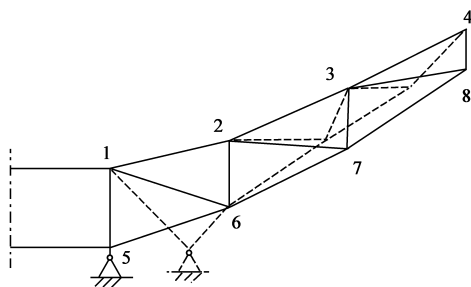


图3 单片纵向筋优化前后结构对比

图 4 是三种优化后天线结构在相同的载荷下,天线远场方向图的对比.可见,相对于无载荷变形时的理论值,天线副瓣都有升高,传统优化副瓣升高量最多,其次是主面优化,考虑馈源优化的结果副瓣升高量最小.具体数据见表 3.波瓣宽度和指向精度基本没有变化.

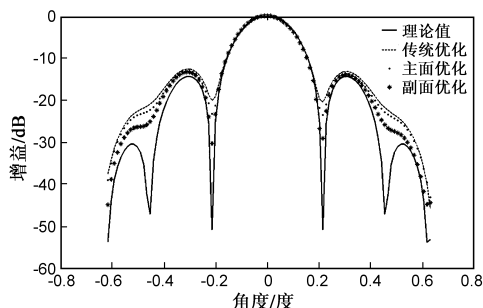


图4 三种优化天线结构的远场方向图对比

表 3 三种优化天线结构主要电性能对比

	左一副瓣(dB)	增益损失(dB)	右一副瓣(dB)
未变形天线	-14.41	0	-14.41
传统优化	-12.67	0.5790	-13.25
主面优化	-13.20	0.2428	-13.79
副面优化	-13.36	0.2351	-14.01

对于包含馈源的耦合优化结果,也可以用最佳吻合面^[7,8]的理论解释:当天线主面变形时,如果馈源移动到变形主面的最佳吻合面的焦点位置,则不会造成天线效率的下降^[11].即馈源的变形或者位移,一定程度上可以补偿主面变形造成的电性能损失,这也是文[10]研究的理论基础.实质上,主面和馈源结构参数对电性能的影响并不是独立的,而是相互耦合、互为补充的.因而在具体的天线结构设计时,两者应该综合考虑,这也是本文着重解决的问题.

5 某 40m 天线的工程应用

将本文的耦合优化模型应用于某 40m 口径陆基抛物面天线.该天线主面口径 40m,焦径比 0.33,工作频段为 S 波段和 X 波段,考虑升级到 ku 波段,仿真的频率为 12.5GHz.天线反射面是实板型和网格型组合而成,主反射面分为 9 圈 464 块.背架与中心体属桁架类,整个天线沿中心体圆周均匀布有 16 片辐射梁,6 道平面桁架式环梁与交叉杆相连.整个天线结构的有限元模型由 65475 个节点和 143748 个单元组成,包括 16917 个梁单元和 126342 个壳单元. ANSYS 模型如图 5(a)所示,该天线背架结构主要包括三类:16 片与中心体连接的辐射梁(如图 5(b)、(c)所示),7 圈周向环形杆件(如图 5(d)所示),辐射梁之间的径向杆件(如图 5(e)所示).其馈源支撑结构包括两类:连接主面和馈源的纵向杆件(如图 5(d)所示)和加强在纵向杆件之间横向杆件(如图 5(e)所示).该天线面精度要求约为 2mm,根据式(3),在 12.5GHz 的增益损失为 3.76dB.

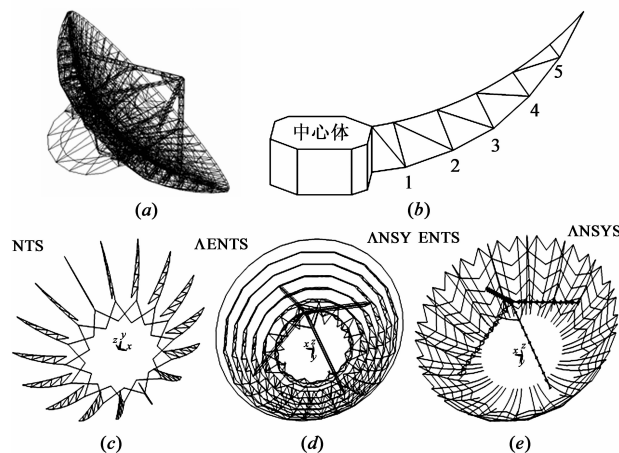


图5 某40m抛物面天线结构示意图

对该天线使用两种优化方法,其优化变量相同,为 5 种梁单元(包括背架和支撑结构)截面积和 5 个下弦结点半径及 Z 向坐标,共 15 个变量.优化变量的含义参见表 4,下弦结点示意图 5(b).(1)传统结构优化,目标为重量最轻,约束为面精度小于 2mm 和最大应力小于 150MPa.(2)包含馈源支撑结构参数的耦合优化,

目标为增益损失最小,约束为天线重量不超过结构优化的值和最大应力小于 150MPa.两种优化载荷相同,为天线指平时的重力.

表 4 优化变量表	
符号	含义
A_1	图 5(b)中辐射梁 4 号点以上杆件
A_2	图 5(b)中辐射梁 1 号至 3 号点之间杆件
A_3	图 5(b)中辐射梁 3 号与 4 号点之间杆件
A_4	图 5(d)中所示杆件,包括背架周向环形杆件和馈源支撑结构纵向杆件
A_5	图 5(e)中所示杆件,包括背架径向杆件和馈源支撑结构横向杆件
Z_i	$i=1,2,\cdots,5$,图 5(b)中所示第 i 个结点的 Z 向坐标
R_i	$i=1,2,\cdots,5$,图 5(b)中所示第 i 个结点的半径

6 结论

传统天线结构设计中存在两点不足:即优化设计时的机电分离和电性能估算时的主面馈源分离.面精度不能完全反映天线电性能,故设计时通常增加面精度指标的设计余量以保证电性能,这样会付出较大的结构代价;馈源的位置误差对面天线电性能有影响,而这种影响是与主面变形共同作用的,因而在面天线的结构设计中,应该同时考虑主面背架和馈源的支撑结构进行机电耦合优化设计,这样才能获得最优的结构设计方案.8m 和 40m 面天线的应用结果表明本文的耦合优化模型效果明显,得出的结果可供具体工程实践参考,对同类型的天线结构设计也有一定的指导作用.

参考文献:

[1] Keyvan Bahadori. Characterization of effects of periodic and aperiodic surface distortion on membrane reflector antenna[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 2005, 53(9): 2782 – 2791.

[2] Sinton Seeling, Rahmat-Samii Yahya. Radom surface error effects on offset cylindrical reflector antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 2003, 51 (6): 1331 – 1337.

[3] Amane Miura, Yahya Rahmat-Samii. Spaceborne mesh reflector antennas with complex weaves: extended PO/Periodic-MoM analysis[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(4): 1022 – 1029.

[4] 狄杰建,段宝岩,杨东武,等.索网式星载展开天线结构纵向调整索数及其初始张力的优化[J]. 机械工程学报, 2005, 14(11), 153 – 157.

Di Jie-jian, Duan Bao-yan, YANG Dong-wu, et al. Optimization on initial cable tensions and number of cables for a cable-net deployable spaceborne antenna[J]. Chinese Journal of

两种优化方法的结果见表 5.

由表 5 可见,结构优化结果的重量为 13659kg,其主面精度为 1.98mm,计算的主面增益损失约为 3.0dB,考虑馈源补偿后的增益损失为 0.36dB.使用本文的耦合优化,天线整体的增益损失为 0.26dB,天线重量仅为 9045kg,不但电性能提高而且重量明显减轻.此时的主面精度为 2.32mm,主面增益损失为 4.2dB,但是在馈源补偿后的增益损失仅为 0.26dB.可见相对于主面和馈源分离的传统结构优化方法,使用本文所提的耦合优化方法将天线的主面和馈源作为一个整体设计,不但提高了电性能,而且由于放松了面精度约束使得结构重量也明显减轻.

表 5 指平情况下的优化结果(尺寸单位:cm)

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
结构优化	14.0	150.0	47.0	17.0	22.0	-101.2	28.8	175.2	339.6	523.4
耦合优化	39.0	27.0	32.0	10.0	33.0	-104.9	30.9	173.8	346.9	523.0
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	rms	dG (dB)	W (kg)		
结构优化	1144.1	1551.8	1355.4	1729.6	1888.1	0.198	0.36	13685		
耦合优化	1126.6	1564.5	1345.1	1724.4	1862.3	0.232	0.26	9045		

Mechanical Engineering, 2005, 14 (11): 153 – 157. (in Chinese)

[5] 张巨勇,施浒立,陈志平.大口径天线电性能风振响应的时域分析[J].应用力学学报,2008,25(1):84 – 88.

Zhang Ju-yong, Shi Hu-li, Chen Zhi-ping, et al. Time domain wind buffeting response of large-diameter antenna electric performances[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2008, 25 (1): 84 – 88. (in Chinese)

[6] 朱敏波,刘明治,徐海强.基于在轨热环境的可展开天线反射面精度调整技术[J].宇航学报,2007,28(3):727 – 730.

Zhu Min-bo, Liu Min-zhi, Xu Hai-qiang. The precision of adjustment technique for deployable truss antenna reflector based on orbit thermal environment[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(3): 727 – 730. (in Chinese)

[7] C S Wang, B Y Duan, Y Y Qiu. On distorted surface analysis and multidisciplinary structural optimization of large reflector antennas[J]. Int J Structural and Multidisciplinary Optimization, 2007, 33(6): 519 – 528.

[8] 王从思,段宝岩,郑飞,等.大型空间桁架面天线的结构电磁耦合优化设计[J].电子学报,2008,36(9):1776 – 1781.

Wang Cong-si, Duan Bao-yan, Zheng Fei, et al. Mechatronic optimization design and analysis of large space parabolic antennas with active truss support structures[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(6): 1776 – 1781. (in Chinese)

[9] 刘京生,曾余庚.天线副面(馈源)支撑结构参数对电性能的影响及其优化[A].天线结构分析、设计与试验的研究论文集[C].西安:西北电讯工程学院,1962.

[10] Robert A. Hoferer, Yahya Rahmat-Samii. Subreflector shaping

for antenna distortion compensation: an efficient fourier-jacobi expansion with GO/PO analysis [J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 2002, 50(12): 1676 – 1687.

- [11] 张巨勇, 施浒立, 张洪波, 等. 40m 射电望远镜天线副面和馈源偏移误差分析[J]. 天文研究与技术, 2007, 4(1): 42 – 47.

Zhang Ju-yong, Shi Hu-li, Zhang Hong-bo, et al. Error analysis and compensation for sub-reflector and feed of 40m radio telescope antenna [J]. Astronomical Research & Technology, 2007, 4(1): 42 – 47. (in Chinese)

- [12] 魏文元, 宫德明, 陈必森. 天线原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985. 241 – 286.

- [13] 李鹏, 张志华, 王伟, 郑飞. 基于不同网格形式的反射面天线方向图分析[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(2): 347 – 351.

Li Peng, Zhang, Zhi-Hua, Wang Wei, Zheng Fei. Far field pattern numerical analysis of reflector antenna based on different grid forms [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(2): 347 – 351. (in Chinese)

- [14] 段宝岩. 天线结构分析、优化与测量[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998. 115 – 138.

作者简介:



李 鹏 男, 1981 年出生于湖北宜昌, 现为西安电子科技大学机电工程学院博士研究生, 主要研究方向为电子装备的机电耦合分析与结构设计.

E-mail: yinhong0523@163.com



郑 飞 男, 1967 年出生于湖南省, 现为西安电子科技大学机电工程学院教授、博士生导师. 主要研究方向为电子装备机电耦合理论、三维造型建模与仿真、星载展开结构等.

E-mail: fzhen@mail.xidian.edu.cn

